干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

新疆孔雀河流域生态基流与天然植被需水量研究

李肖杨[1,2]， 朱成刚[1]， 马玉其[3]， 王新友[3]， 王军政[3]， 陈亚宁[1]

（1. 中国科学院新疆生态与地理研究所荒漠与绿洲生态国家重点实验室，新疆 乌鲁木齐 830011；2. 中国科学院大学资源与环境学院，北京 100049；3. 新疆塔里木河流域巴音郭楞管理局，新疆 库尔勒 841000）

摘 要：研究和确定流域生态基流及天然植被需水量是为了遏制因河道断流或流量减少而造成的生态环境退化，以确保流域生态系统健康发展。根据孔雀河流域植被类型分布及多年径流状况，将河道分为A、B两部分，A段为孔雀河上游塔什店至第三分水枢纽常年未断流河道；B段为第三分水枢纽以下天然植被主要分布区。基于塔什店水文站近50 a水文数据，结合Tennant法等4种方法对A段河道生态基流进行估算；选择潜水蒸发法、定额法对B段距河道1 km辐射范围内的天然植被需水量进行计算。结果表明：Tennant法估算的年均生态基流为9.13 $m^3 \cdot s^{-1}$，对应基本生态水量为2.88×10^8 $m^3 \cdot a^{-1}$，满足A段河道2000—2018年多年平均河损，且近10 a（2009—2018年）塔什店实测年均流量均可满足此生态基流标准；B段河道辐射范围内天然植被总面积为4.66×10^4 hm^2，生态需水量为0.95×10^8 $m^3 \cdot a^{-1}$，以孔雀河生态输水工程为例科学调控水资源，在满足A段基本生态基流的同时兼顾B段天然植被需水量。研究结果对实现孔雀河河道修复和不同水平年下生态供水具有一定的意义。

关 键 词：生态基流；生态需水；天然植被；水资源规划；孔雀河

文章编号：

生态基流和天然植被需水量是维系流域生态系统运转的2个基本要素，研究和确定这2个基本要素对于遏制河道断流、防止流域生态退化具有重要意义[1]。近年来在水资源规划中，生态环境用水得到了越来越多的重视[2-4]，其中作为水资源规划建设的重要地带，中国西北干旱区生态环境较为脆弱，水资源短缺、水生态失衡等问题日趋凸显[5]，且在水资源较为充沛的流域地区又因人类对水资源的无序开发而导致生态环境的进一步衰败[6]。因此，保障河道不断流及满足流域内天然植被基本生态需水是目前干旱区水资源规划需解决的关键问题[7]。

孔雀河位于新疆博斯腾湖流域下游，在近年水资源短缺且来水不确定性加剧的背景下，孔雀河流域总需水量、农业需水量均呈显著的增加趋势[8]，同时在流域的主要土地利用覆盖类型中，耕地、城乡工矿居民用地面积大幅度增加，林地、水域面积大幅减少[9]，孔雀河河道已从上游第三枢纽处近700 km呈现多年断流，河道及周围植被生态需水得不到保证[10]。开展孔雀河水资源规划研究，合理分配流域水量，不仅是抑制生态系统退化的良方，也是对"绿水青山就是金山银山"理论的践行，对此相关学者已经进行积极的研究。例如李卫红等[11]利用蒸发系数等方法对孔雀河流域绿洲自然生态需水进行综合计算，为孔雀河地区生态输水和用水规划奠定基础；何振磊等[12]运用典型样地法，探讨了孔雀河流域不同恢复模式对植被恢复效果的影响，肯定了生态输水对植被多样性恢复的作用；王长建等[13]对孔雀河水资源承载力进行评估，指出了产业结构和用水结构的动力影响因子；王文辉等[14]采用二阶

收稿日期：2020-05-06； **修订日期：**2020-07-12

基金项目：中国科学院战略性先导科技专项（XDA20100303）资助

作者简介：李肖杨（1995-），男，硕士，主要从事生态水文研究. E-mail: lixiaoyang18@mails.ucas.ac.cn

通讯作者：陈亚宁（1958-），男，研究员，博士生导师，主要从事生态水文研究. E-mail: chenyn@ms.xjb.ac.cn

段区间优化算法,结合水文,气象和土地利用数据建立水资源配置优化模型,对孔雀河地区水资源利用进行配置。

可以看出,从孔雀河绿洲需水量计算到水资源优化配置,已有的研究多是基于整个流域大范围内的水资源规划,对孔雀河自身未断流河段基本生态基流调控以及河道辐射范围内的天然植被需水量研究较少[15-16]。本文基于孔雀河多年径流量数据以及由Landsat影像解译出的2018年植被生长季时期的流域土地利用类型,结合多种方法对相应河段范围内的生态基流与天然植被需水量进行估算,进一步为孔雀河水资源规划利用提供决策参考。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

孔雀河位于新疆巴音郭楞蒙古族自治州境内,地处85°22′~89°46′E、39°40′~42°11′N,其地势自西北向东南由库鲁克塔格山到塔克拉玛干沙漠逐渐降低,是开都河汇入博斯腾湖后受人为控制调节出流的河流。塔什店水文站监测的孔雀河多年平均径流量为14.44×10^8 m^3(1972—2018年)。河流自塔什店后,穿过铁门关峡谷,流经库尔勒市、贯穿尉犁县全境以及31、33、34团场,最后注入罗布泊,是当地工业、农业、经济赖以发展的命脉(图1)。

若以博斯腾湖至罗布泊来计,孔雀河全长942 km,库尔勒市的普惠水库和尉犁县的阿克苏甫水库将河道划分为上、中、下游3部分河段。流域内气候干旱、蒸发严重,其天然植被主要是以地下水补给为主,自2014年以来已建成5条地下水位监测断面(KS、KZ、K1、K2、K3),其位置如图1所示。每条断面设5眼地下水监测井,每眼监测井距河道的距离分别为:100 m、200 m、400 m、600 m和800 m,在监测孔雀河流域地下水位变化的同时兼顾对其生态补水效益的评估[17]。

由流域土地类型可知,孔雀河上游主要以耕地为主,自然植被分布较少,且上游河段为博斯腾湖下泄水量的主要监测区,多年径流平稳河损稳定,其生态基流的研究对于孔雀河中下游生态输水工程具有一定的指导意义,故将孔雀河上游塔什店至第三分水枢纽常年未断流河段(A段)作为生态基流的主要研究区域,将孔雀河第三分水枢纽以下KS至K3断面(B段)作为天然植被需水量研究区。生态基流主要控制点选择孔雀河唯一的水文监测站——塔什店水文站,并以A段河道河损为主要判断依据,结合B段生态输水确定该河道未来生态基流的适宜

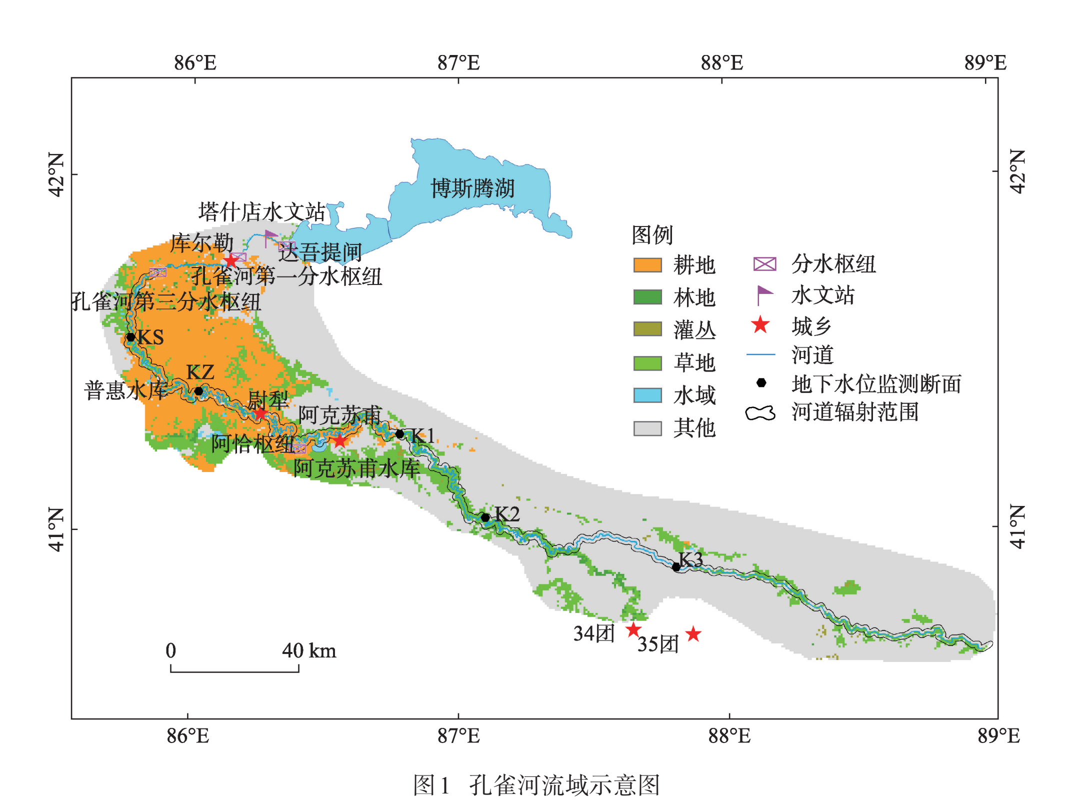


图1 孔雀河流域示意图

Fig. 1 Sketch of the Konqi River Basin

数值。对于流域生态保护范围，由于天然植被主要靠地下水维系，依据生态输水前后各断面地下水位变化研究，B段河道对周边地下水的最大影响半径约为956.8 m[18]，而实地勘测发现，下游K1、K2、K3断面虽地下水位埋深较浅，但在距离河道600 m、800 m处土地沙化严重，植被覆盖度不足3%[17]，生态输水对地下水和植被的辐射范围存在一定的差异。故为避免偶然性，以孔雀河为中心建立半径为1 km的缓冲区[19]，将此区间内的植被定义为孔雀河河道辐射范围内自然分布的全部植被，如图1所示，其植被总面积为4.66×10^4 hm²。另外，为方便需水划分及用水规划，以“孔雀河B段全部天然植被”和“孔雀河B段生态敏感区天然植被”分为不同植被范围进行需水计算。其中“孔雀河B段生态敏感区天然植被”主要分布在阿克苏甫水库以下河道，是以在现状条件下，为了逐步推进植被保护总目标划分出的流域供水可优先考虑的下游具有重要生态防护功能的敏感区天然植被[20]，具体面积见表1。

表1　孔雀河B段不同范围天然植被类型及面积

Tab. 1　Natural vegetation types and areas of different ranges in section B of Konqi River

植被类型	全部天然植被 /10^4 hm²	生态敏感区天然植被 /10^4 hm²
林地	0.32	0.09
灌丛	0.11	0.05
草地	4.23	3.37
合计	4.66	3.51

1.2　研究方法

采用4种方法对孔雀河上游未断流河段生态基流进行估算，包括目前国内外应用广泛的Tennant法、年型划分法、最枯月平均流量多年平均值法和90%保证率法。对于孔雀河流域不同范围天然植被需水量计算则采用潜水蒸发法和定额法。

1.2.1　Tennant法

Tennant法又叫做蒙大拿法，是一种依据观测资料建立起来的流域流量与生态质量之间的经验方法[21]。只需根据水资源规划目标选择合适的基流标准，结合历史径流资料进行计算，其结果具有宏观的指导意义，适用于生态资料缺乏的地区。Tennant法对流域生态质量的描述如表2所示。研究表明，多年平均径流量的10%是保持河流生态系统健康的最小流量，考虑到孔雀河有限的水资源量，在计算生态基流量时选用多年平均流量的10%[22]。

表2　Tennant法推荐的基流标准

Tab. 2　Baseflow standard recommended by Tennant method

流域质量的定性描述	基流标准(年平均天然流量百分数)/%	
	一般用水期（10月至翌年3月）	鱼类产卵期（4—9月）
最大	200	200
最佳	60~100	60~100
极好	40	60
非常好	30	50
好	20	40
中	10	30
差或最小	10	10
极差	0~10	0~10

1.2.2　年型划分法

年型划分法是采用距平百分率进行流域不同水平年的划分[23]，计算公式为：

$$E_i = \frac{Q_i - Q_n}{Q_n} \times 100\% \tag{1}$$

式中：Q_n、Q_i分别为流域多年平均径流量和第i年平均径流量(m³)；E_i为第i年流域径流量的距平百分率(%)。不同水平年的划分标准见表3，以距平百分率最接近−20%的年份作为典型年，取该年枯水期平均流量作为生态基流，由此估算年基本生态环境需水量。

1.2.3　最枯月平均流量多年平均值法

最枯月平均流量多年平均值法计算公式为[23]：

$$W = \frac{T}{n}\sum_{n=1}^{n} \min Q_{ij} \times 10^{-8} \tag{2}$$

式中：W为河流基本生态水量(m³)；Q_{ij}为第i年第j月的平均流量(m³·s⁻¹)；T为换算系数，其值为

表3　丰、平、枯水年划分标准

Tab. 3　Standards for dividing abundant, flat and dry years

年型	丰水年	平水年	枯水年	特枯水年
距平百分率(E_i)/%	$E_i>10$	$-10<E_i\leq10$	$-20<E_i\leq-10$	$E_i\leq-20$
频率分析(P)/%	$P\leq37.5$	$37.5<P\leq62.5$	$62.5<P\leq87.5$	$P>87.5$

31.536×10^6 s；n 为统计年数。

1.2.4 90%保证率法 该方法是对多年最枯月平均流量进行频率分析，一般采用90%保证率下最枯月平均流量作为生态基流。该方法要求流域有较长序列的水文观测资料（一般不低于20 a），适合开发程度较高但水量较小的河流[24]。

1.2.5 潜水蒸发法 潜水蒸发法是通过潜水蒸发量来反映植被生态需水，适用于依赖地下水生存的干旱区植被[25]。公式如下：

$$W = E \times A \tag{3}$$

式中：W 代表潜水蒸发量（mm）；A 为要维持或保护的植被面积（km^2）；E 表示潜水蒸发强度（mm）。E 通常利用阿维里扬诺夫公式来进行计算：

$$E = a(1 - H/H_{max})^b E_{\phi 20} \tag{4}$$

式中：$E_{\phi 20}$ 为常规气象蒸发皿观测值（mm）；H 为地下水埋深（m）；H_{max} 为地下水极限埋深（m）；a、b 为经验系数分别取0.62、2.80。

1.2.6 定额法

$$W_P = \sum_{i=1}^{n} W_{pi} = A_i m_{pi} \tag{5}$$

式中：P 为植被需水保证率（%）；W_{pi} 为植物定额需水量（m^3）；A_i 为 i 类植被面积（km^2）；m_{pi} 为响应保证率植被需水定额（$m^3 \cdot km^{-2}$）；n 为植被类型数。

2 结果与分析

2.1 孔雀河A段河道生态基流计算

塔什店水文站为孔雀河从博斯腾湖出流后唯一的水文监测站，采用Tennant法、年型划分法、最枯月流量法以及90%保证率法结合1972—2018年的塔什店水文数据计算孔雀河A段生态基流，并以2000—2018年该河道年均河损为标准，对比4种方法估算结果如表4所示。

对比Tennant法、年型划分法、最枯月流量法和90%保证率法估算确定的孔雀河最小生态流量可知，Tennant法计算结果与A段多年平均河损值最为接近，年生态水量 2.88×10^8 m^3，相对较为适宜；最枯月流量法计算结果较大，而年型划分法、90%保证率法确定的生态水量无法满足A段多年平均河损值。故最终采用基于Tennant法的计算结果，其年均生态基流为9.13 $m^3 \cdot s^{-1}$，对应的逐月生态基流与生态水量见表5。

2.2 孔雀河B段不同范围天然植被需水量计算

结合定额法、潜水蒸发法对孔雀河B段不同范围植被需水量进行计算。由计算结果可知（表6），其数值相近，取2种方法的平均作为其结果。孔雀河B段全部天然植被需水 0.95×10^8 $m^3 \cdot a^{-1}$，生态敏感

表4 孔雀河A段河道生态基流与对应生态水量计算结果

Tab. 4 Calculation results of ecological baseflow and corresponding ecological water volume in section A of the Konqi River

方法名称	生态基流/$m^3 \cdot s^{-1}$	对应基本生态水量/10^8 m^3	备注说明
Tennant法	9.13	2.88	以保障河流最小健康水平的径流比例计算
年型划分法	2.89	0.91	选定1984年枯水期平均流量计
最枯月流量法	10.58	3.34	以近10 a最枯月平均流量计
90%保证率法	2.54	0.80	以90%保证率选定1985年最枯月流量

注：塔什店至孔雀河第三分水枢纽多年平均河损为 2.80×10^8 m^3。

表5 孔雀河A段河道生态基流与对应生态水量月标准

Tab. 5 Monthly ecological baseflow and corresponding ecological water volume in section A of Konqi River

枯水期	12月	翌年1月	翌年2月			
生态基流/$m^3 \cdot s^{-1}$	5.13	4.27	3.99			平均4.46
生态水量/10^8 m^3	0.13	0.11	0.10			合计0.36
平水期	3月	9月	10月	11月		
生态基流/$m^3 \cdot s^{-1}$	9.12	8.83	8.26	8.83		平均8.76
生态水量/10^8 m^3	0.24	0.23	0.21	0.23		合计0.91
丰水期	4月	5月	6月	7月	8月	
生态基流/$m^3 \cdot s^{-1}$	11.40	10.54	12.25	14.53	13.96	平均12.54
生态水量/10^8 m^3	0.30	0.27	0.32	0.38	0.36	合计1.62

表6　孔雀河B段不同范围天然植被生态需水量

Tab. 6　Ecological water requirement of natural vegetation in different ranges of section B of Konqi River

保护目标	平均需水量/10^8 $m^3 \cdot a^{-1}$	面积/10^4 hm^2	定额法/10^8 m^3	潜水蒸发法/10^8 m^3
孔雀河B段全部天然植被	0.95	4.66	1.05	0.84
孔雀河B段生态敏感区天然植被	0.74	3.51	0.79	0.70

区天然植被需水量为0.74×10^8 $m^3 \cdot a^{-1}$，且需水量多集中于年内植被生长季4—10月。

2.3 生态基流现状评价及生态输水规划

2.3.1 生态基流现状及满足程度　对比孔雀河塔什店水文站近10 a(2009—2018年)实测月流量数据与Tennant法计算确定的孔雀河A段生态基流标准(表7)，过去10 a实测塔什店流量在年内丰水期暨用水高峰期均大于确定的生态基流，满足度均为100%，同时近10 a多年平均月流量也均实现生态基流100%达标。但是在年内平水期和枯水期个别年份的月均流量无法达标，10个年份中满足度在70%~90%之间，特别是枯水期的1—2月，满足度均为70%。

由于流量与径流的一一对应关系，Tennant法确定的生态基流对应生态水量的达标情况与流量一致。所以为了更好的评价年内不同时段生态水量的满足情况，对比过去10 a实测塔什店年内冰封期、平水期和丰水期的来水量可以看出(表8)，年内平水期和丰水期径流量均大于相应时段内Tennant法确定的生态水量，满足度均为100%。只有年内冰封期(12月至翌年2月)近10 a满足度为90%，而从近10 a多年平均生态水量来看，各时段生态基流对应生态水量的满足度也均可以达到100%。

2.3.2 不同生态保护目标下的生态输水规划　(1) 生态保护输水路线规划。孔雀河生态输水工程于2016年开始实施，输水时段集中于年内7—9月，下泄水量以孔雀河第一分水枢纽计，输水水头以到达下游K3断面为准，其目的为在有限的输水期内达到最大的生态效益，以抢救孔雀河中、下游极度衰败的荒漠河岸林。由于孔雀河第三分水枢纽以下常年断流，起初河道水量下渗严重，生态输水河损较大，随着输水工程实施，输水水头到达孔雀河下游K3断面所用水量和时间逐渐减少，河损值趋于平稳。例如2018年生态输水水头仅44 d即到达孔雀河K3断面，比2017年提前43 d，生态输水量10^8 m^3左右，比2017年水头到达K3断面所用生态水量4.25×10^8 m^3显著减少。因此以2018年为准，定义10^8 m^3水量为孔雀河生态输水时段中第一枢纽至K3断面的耗水量。结合新疆塔里木河流域巴音郭楞管理局提供的河损资料得出，在输水时段内，孔雀河A段河损值约为0.83×10^8 m^3，其中塔什店至孔雀河第一枢纽河损为0.70×10^8 m^3，孔雀河第一枢纽至第三分水枢纽河损为0.13×10^8 m^3，由此得出孔雀河第三分水枢纽至K3断面河损值约为0.87×10^8 m^3。

表7　孔雀河A段河道生态基流满足程度评价

Tab. 7　Evaluation on the satisfaction degree of ecological baseflow in the section A of the Konqi River　/$m^3 \cdot s^{-1}$

	年份	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
塔什店实测流量	2009	38.2	38.9	63.0	66.2	57.7	76.5	89.7	89.7	31.4	24.7	60.1	59.7
	2010	52.2	39.4	61.4	50.6	36.0	55.1	82.4	93.2	37.0	26.9	49.9	52.7
	2011	43.8	39.5	48.9	53.0	35.1	80.6	91.2	93.2	31.1	25.5	50.4	53.7
	2012	39.5	40.1	64.2	48.8	32.6	75.5	93.7	72.6	9.8	3.0	19.0	17.4
	2013	11.3	3.3	50.4	56.7	21.0	72.6	74.8	45.8	4.1	1.6	8.8	0.9
	2014	0.1	0.1	35.7	40.8	21.2	44.1	68.9	63.7	23.6	19.9	31.5	7.4
	2015	3.6	2.8	32.9	60.5	40.5	57.9	77.9	71.3	26.5	4.4	24.9	26.5
	2016	3.7	10.2	40.5	57.4	15.4	41.4	79.9	75.3	43.7	29.6	46.8	39.9
	2017	9.9	9.7	49.4	46.0	36.5	70.1	83.7	100.4	79.4	71.7	71.8	16.5
	2018	8.6	11.6	58.6	82.6	73.4	77.2	91.5	84.0	65.2	26.5	39.7	20.9
	平均	21.1	19.5	50.5	56.2	36.9	65.1	83.4	78.9	35.2	23.4	40.3	29.5
生态基流		4.3	4.0	9.1	11.4	10.5	12.3	14.5	14.0	8.8	8.3	8.8	5.1
满足度		0.7	0.7	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.7	0.9	0.9

表8　孔雀河A段河道生态基流对应生态水量满足程度评价

Tab. 8　Evaluation on the satisfaction degree of ecological water volume corresponding to the ecological baseflow in section A of the Konqi River

$/10^8\ m^3$

	年份	年内冰封期	年内平水期	年内丰水期	全年径流量
塔什店实测径流量	2009	3.60	4.72	10.05	18.36
	2010	3.80	4.62	8.40	16.82
	2011	3.60	4.10	9.34	17.05
	2012	2.53	2.55	8.55	13.62
	2013	0.41	1.73	7.15	9.28
	2014	0.20	2.92	6.32	9.43
	2015	0.87	2.33	8.15	11.36
	2016	1.42	4.22	7.13	12.78
	2017	0.94	7.16	8.92	17.02
	2018	1.07	5.00	10.81	16.88
	平均	1.84	3.93	8.48	14.26
生态基流对应生态水量		0.36	0.91	1.62	2.88
满足度		0.90	1.00	1.00	1.00

在综合考虑生态输水水源、输水路线距离、输水沿途可能的损耗等情况下，确定了向孔雀河生态输水采用多渠道、多路线分段协同实施的方案，路线图如图2所示。其中西线以孔雀河主干道为主，这一输水路线河损相对较大，可以考虑在有限的丰水期内作为整个输水路线的补充。东线即由孔雀河第一分水枢纽，经西尼尔水库至孔雀河下游路线为主，此干道相对于孔雀河主干道缩短了近1/2的路程，确保生态输水可以顺利到达下游地区并满足孔雀河下游天然植被生态需水。

(2) 以保护孔雀河B段全部天然植被为目标的输水规划。当孔雀河遇丰水年，以保护B段全部天然植被为目标的情景下，需满足河道辐射范围内的所有天然植被$0.95\times10^8\ m^3\cdot a^{-1}$的生态需水(表6)。考虑到孔雀河B段植被的分布范围，$0.95\times10^8\ m^3\cdot a^{-1}$的生态输水以孔雀河第三分水枢纽计。在此保护目标下，输水期间(7—9月)孔雀河A段生态基流对应的生态水量为$0.97\times10^8\ m^3$，满足此期间河损$0.83\times10^8\ m^3$，因此塔什店水文站只需在此基础上保证向西线下泄$1.68\times10^8\ m^3$生态水量即可，以满足此期间孔雀河B段第三分水枢纽至K3断面$0.87\times10^8\ m^3$河损及天然植被需水量。

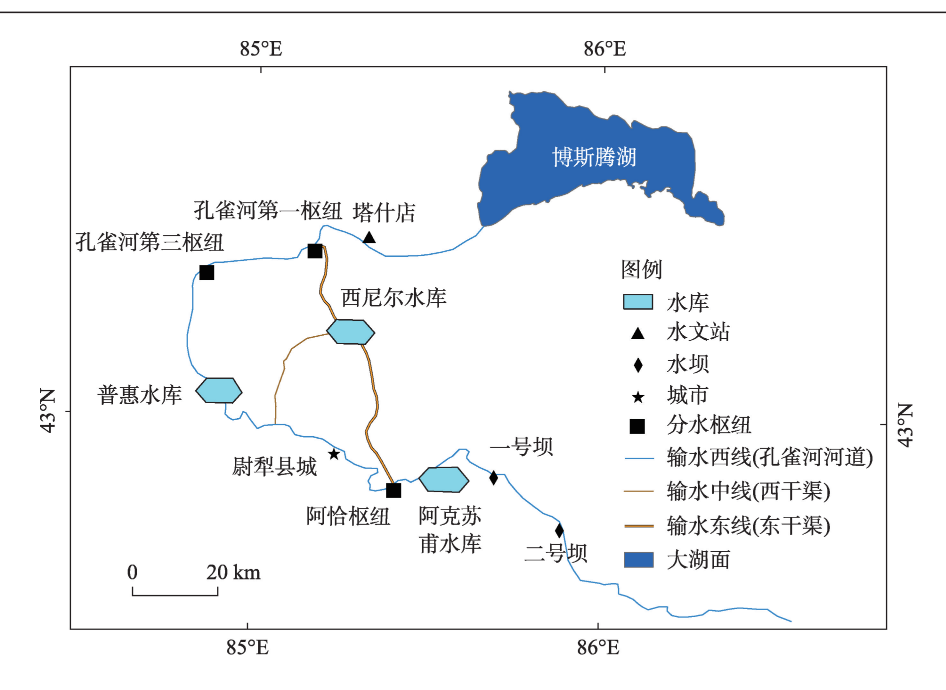
(3) 以保护孔雀河B段生态敏感区天然植被为目标的输水规划。遇流域平水年或偏枯水年，难以保证孔雀河B段全部天然植被生态需水的情景下，若以保护孔雀河下游生态敏感区天然植被为目标，则需要保证$0.74\times10^8\ m^3\cdot a^{-1}$的生态水量。在7—9月生态输水期间，依据生态基流和河损估算，塔什店需保证向西线下泄$2.44\times10^8\ m^3$水量，对应3个月平均生态流量31.37 $m^3\cdot s^{-1}$。

考虑到孔雀河主干道河损较大，在平水年或枯水年内塔什店可能难以在输水期间达到西线下泄水量标准。因此建议在此保护目标下，塔什店对孔雀河西线的下泄水量应以维持A段基本生态基流为准，下游天然植被生态输水应避开孔雀河主干河道以第一分水枢纽沿东干渠输水渠道经阿恰枢纽下泄(图2)，确保生态输水可以顺利到达下游地区并满足孔雀河生态敏感区天然植被生态需水。

3　结　论

(1) 基于孔雀河流域实际径流状况及天然植被分布范围，对孔雀河生态基流和天然植被需水量进行分段研究。生态基流主要是针对孔雀河塔什店至第三分水枢纽常年未断流河段(A段)，此河段河损值常年稳定，以此为依据选择的基流标准可实现在满足A段河损情况下承接对下游的生态输水；孔雀河植被需水量研究以第三分水枢纽以下河段(B段)为主，该生态范围主要是根据河道对周围植被需水量的辐射范围来确定的，改变了以往基于整个孔雀河流域的计算方式，利于生态输水工程规划。

(2) A段生态基流选择Tennant法计算结果，年



注：西线为博斯腾湖–塔什店–孔雀河第一枢纽–普惠水库–阿恰枢纽–孔雀河下游；
东线为博斯腾湖–塔什店–孔雀河第一枢纽–西尼尔水库–孔雀河下游。

图2 孔雀河生态保护输水路线示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the Konqi River ecological protection water delivery route

均生态流量9.13 $m\cdot s^{-1}$，对应生态水量2.88×10^8 m^3，由近10 a月均径流量均大于生态基流及对应水量来看，孔雀河塔什店水文站的实际现状流量和水量是可以满足河道基本水量需求的，对于部分年份的缺水情况，可作为借鉴，完善博斯腾湖对孔雀河不同水平年的具体水量分配。

（3）针对不同的水平年，将孔雀河B段天然植被分为2个保护范围。利用不同范围植被需水量配合河道生态基流计算结果，能够在输水期间实现下游生态供水的同时保证A段生态基流。

（4）文中输水调配方案是根据近几年生态输水数据得出的结论，以实际数据科学调控孔雀河水资源，对维系流域生态安全、促进流域水资源规划的可持续发展具有一定的现实意义。

参考文献（References）

[1] 刘静玲, 杨志峰, 肖芳, 等. 河流生态基流量整合计算模型[J]. 环境科学学报, 2005, 25(4): 436–441. [Liu Jingling, Yang Zhifeng, Xiao Fang, et al. Conformity calculation models on river ecological basic flows[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2005, 25(4): 436–441.]

[2] 李丽君, 张小清, 陈长清, 等. 近20 a塔里木河下游输水对生态环境的影响[J]. 干旱区地理, 2018, 41(2): 238–247. [Li Lijun, Zhang Xiaoqing, Chen Changqing, et al. Ecological effects of water conveyance on the lower reaches of Tarim River in recent twenty years[J]. Arid Land Geography, 2018, 41(2): 238–247.]

[3] 尹小君, 周可法, 包安明, 等. 基于RS的新疆哈密地区生态环境需水分析[J]. 干旱区地理, 2007, 30(3): 357–363. [Yin Xiaojun, Zhou Kefa, Bao Anming, et al. Eco-environmental water demand in Hami, Xingjiang, based on RS[J]. Arid Land Geography, 2007, 30(3): 357–363.]

[4] 龙爱华, 魏潇娜, 张继, 等. 近16年来新疆内陆河区生态耗水及其变化分析[J]. 水利水电技术, 2019, 50(12): 170–177. [Long Aihua, Wei Xiaona, Zhang Ji, et al. Analysis of ecological water consumption and its variation in inland river regions in Xinjiang in recent 16 years[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2019, 50(12): 170–177.]

[5] 周侃, 樊杰, 王亚飞, 等. 干旱半干旱区水资源承载力评价及空间规划指引——以宁夏西海固地区为例[J]. 地理科学, 2019, 39(2): 232–241. [Zhou Kan, Fan Jie, Wang Yafei, et al. Evaluation of water resources carrying capacity and its guidelines for spatial planning in arid and semi-arid region: A case in Xiji-Haiyuan-Guyuan area of Ningxia[J]. Scientia Geographica Sinica, 2019, 39(2): 232–241.]

[6] 杨媛媛, 徐长春, 罗映雪, 等. 基于植被蒸散发法的孔雀河流域天然植被生态需水估算[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(4): 106–115. [Yang Yuanyuan, Xu Changchun, Luo Yingxue, et al. Estimation of ecological water requirement for the natural vegetation in the Kongque River Basin based on vegetation evapotranspiration[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(4): 106–115.]

[7] 熊宇斐. 新疆塔里木河流域水资源统一管理成效分析[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2017. [Xiong Yufei. Effectiveness evaluation of the water resources unified management of Tarim River Basin in Xinjiang[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2017.]
[8] 张家凤. 开都河—孔雀河流域水资源优化配置研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2012. [Zhang Jiafeng. Study on optimized allocation of water resources in Kaidu River-Kongque River Basin[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2012.]
[9] 秦景秀, 郝兴明, 张颖, 等. 气候变化和人类活动对干旱区植被生产力的影响[J]. 干旱区地理, 2020, 43(1): 117-125. [Qin Jingxiu, Hao Xingming, Zhang Ying, et al. Effects of climate change and human activities on vegetation productivity in arid areas[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(1): 117-125.]
[10] 陈亚宁, 杜强, 陈跃滨, 等. 博斯腾湖流域水资源可持续利用研究[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 1-25. [Chen Yaning, Du Qiang, Chen Yuebin, et al. Sustainable utilization of water resources in Bosten Lake Basin[M]. Beijing: Science Press, 2013: 1-25.]
[11] 李卫红, 陈忠升, 李宝富, 等. 新疆开都—孔雀河流域绿洲需水量与稳定性分析[J]. 冰川冻土, 2012, 34(6): 1470-1477. [Li Weihong, Chen Zhongsheng, Li Baofu, et al. Analysis of water demand and stability for oasis in Kaidu-Kongque River Basin, southern Xinjiang[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2012, 34(6): 1470-1477.]
[12] 何振磊, 陈亚鹏, 孙海涛. 不同恢复模式对塔里木河下游物种多样性及恢复速率的影响[J]. 生态环境学报, 2019, 28(8): 1531-1539. [He Zhenlei, Chen Yapeng, Sun Haitao. Effects of different recovery patterns on species diversity and recovery rate in the lower reaches of Tarim River[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2019, 28(8): 1531-1539.]
[13] 王长建, 张小雷, 杜宏茹, 等. 开都河—孔雀河流域水资源承载力水平的综合评价与分析[J]. 冰川冻土, 2012, 34(4): 990-998. [Wang Changjian, Zhang Xiaolei, Du Hongru, et al. Comprehensive evaluation and analysis on the water resources carrying capacity levels in the Kaidu-Kongqi River Basin[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2012, 34(4): 990-998.]
[14] 王文辉, 黄粤, 刘铁, 等. 开都—孔雀河流域水资源优化配置[J]. 干旱区研究, 2018, 35(5): 1030-1039. [Wang Wenhui, Huang E, Liu Tie, et al. Optimized redistribution of water resources in the Kaidu-Kongque River Basin[J]. Arid Zone Research, 2018, 35(5): 1030-1039.]
[15] 周丹, 沈彦俊, 陈亚宁, 等. 西北干旱区荒漠植被生态需水量估算[J]. 生态学杂志, 2015, 34(3): 670-680. [Zhou Dan, Shen Yanjun, Chen Yaning, et al. Estimation of ecological water requirement of desert vegetation in the arid region of northwest China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2015, 34(3): 670-680.]
[16] 徐宗学, 武玮, 于松延. 生态基流研究: 进展与挑战[J]. 水力发电学报, 2016, 35(4): 3-13. [Xu Zhongxue, Wu Wei, Yu Songyan. Ecological baseflow: Progress and challenge[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2016, 35(4): 3-13.]
[17] 刘加珍, 李卫红, 陈永金, 等. 孔雀河下游衰退河岸林的沙漠化分析[J]. 聊城大学学报(自然科学版), 2018, 31(1): 65-71, 103. [Liu Jiazhen, Li Weihong, Chen Yongjin, et al. Analysis on desertification of degraded riparian forest in the lower reaches of Peacock River[J]. Journal of Liaocheng University (Naturnal Sciences Edition), 2018, 31(1): 65-71, 103.]
[18] 李玉朋, 吾买尔江·吾布力, 何宇, 等. 新疆孔雀河沿岸地下水位变化的影响半径模拟分析[J]. 环境与可持续发展, 2017, 42(2): 145-147. [Li Yupeng, Wubuli Wumaierjiang, He Yu, et al. Simulation analysis on the radius of influence of ground water level change along the Kongque River, Xinjiang[J]. Environment and Sustainable Development, 2017, 42(2): 145-147.]
[19] 汪涛. 库尔勒: 集中整治孔雀河中下游两岸环境[EB/OL]. [2018-03-02]. http://www.xjdaily.com/c/2018-03-02/2014526.shtml. [Wang Tao. Korla: Centralized regulation of the environment on both sides of the middle and lower reaches of Kongque River[EB/OL]. [2018-03-02]. http://www.xjdaily.com/c/2018-03-02/2014526.shtml.]
[20] 周洪华, 吾买尔江·吾布力, 郝兴明, 等. 孔雀河流域天然植被生态需水量估算[J]. 环境与可持续发展, 2017, 42(2): 140-144. [Zhou Honghua, Wubuli Wumaierjiang, Hao Xingming, et al. Estimation of ecological water demand of natural vegetation in Konqi River Basin[J]. Environment and Sustainable Development, 2017, 42(2): 140-144.]
[21] Tennant D L. Instream flow regimens for fish, wildlife, recreation and related environmental resources[J]. Fisheries, 1976, 1(4): 6-10.
[22] 武玮, 徐宗学, 左德鹏. 渭河关中段生态基流量估算研究[J]. 干旱区资源与环境, 2011, 25(10): 68-74. [Wu Wei, Xu Zhongxue, Zuo Depeng. Ecological baseflow in the Guanzhong reach of the Wei River[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2011, 25(10): 68-74.]
[23] 魏雯瑜, 刘志辉, 冯娟, 等. 天山北坡呼图壁河生态基流量估算研究[J]. 中国农村水利水电, 2017(6): 92-96. [Wei Wenyu, Liu Zhihui, Feng Juan, et al. A study of the estimation of the Hutubi River ecological base flow in the north slope of the Tianshan Mountains[J]. China Rural Water and Hydropower, 2017(6): 92-96.]
[24] 石永强, 左其亭. 基于多种水文学法的襄阳市主要河流生态基流估算[J]. 中国农村水利水电, 2017(2): 50-59. [Shi Yongqiang, Zuo Qiting. The estimation of ecological base flow of main rivers in Xiangyang City based on multiple hydrological methods[J]. China Rural Water and Hydropower, 2017(2): 50-59.]
[25] 刘新华, 徐海量, 凌红波, 等. 塔里木河下游生态需水估算[J]. 中国沙漠, 2013, 33(4): 1198-1205. [Liu Xinhua, Xu Hailiang, Ling Hongbo, et al. Ecological water requirements in the lower reaches of the Tarim River[J]. Journal of Desert Research, 2013, 33(4): 1198-1205.]

Ecological baseflow and natural vegetation water requirement of Konqi River Basin, Xinjiang

LI Xiaoyang[1,2], ZHU Chenggang[1], MA Yuqi[3], WANG Xinyou[3], WANG Junzheng[3], CHEN Yaning[1]

(1. State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, Xinjiang, China; 2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Bayingolin Management Bureau of Xinjiang Tarim River Basin, Korla 841000, Xinjiang, China)

Abstract: The Konqi River is in the lower reaches of the Bosten Lake Basin in Xinjiang, China, and its ecological environment is relatively fragile. Recently, water resources shortage, water ecological imbalance, and other issues have become increasingly prominent under the dual influence of human and natural factors. This paper studies the ecological baseflow and natural vegetation water requirement of the Konqi River Basin, which could provide a decision-making reference for planning and using the Konqi River resources to curb the ecological environmental degradation caused by river interruption or flow reduction. First, based on the distribution of vegetation types and annual runoff conditions in the Konqi River Basin, the river channel is divided into Parts A and B. Section A's river channel has not been cut off all year round and reaches from the Tashidian Hydrological Station on the upper reaches of the Konqi River to the third water diversion project. Section B is the main distribution area of natural vegetation under the third water diversion project of the Konqi River. Second, based on the hydrological data of the Tashidian Hydrological Station of the Konqi River of the last 50 years, the ecological baseflow of Section A is estimated using the Tennant, annual classification, annual average value of the lowest monthly average flow, and 90% assurance rate methods. The phreatic water evaporation and quota methods are selected to calculate the water requirement of natural vegetation within the radiation range of Section B's river channel. The results show that the annual average ecological baseflow estimated using the Tennant method is 9.13 $m^3 \cdot s^{-1}$, and the corresponding basic ecological water volume is 2.88×10^8 $m^3 \cdot a^{-1}$. These values can meet the river loss value of Section A from 2000 to 2018, and the actual annual average runoff from 2009 to 2018 can also meet the ecological baseflow standard. For calculating Section B's natural vegetation water requirement using the change in groundwater levels around the river after ecological water transfer and analyzing field survey data, all natural vegetation within one kilometer from the river is defined as the main ecological protection area, with an area of 4.66×10^4 hm^2 and ecological water requirement of 0.95×10^8 $m^3 \cdot a^{-1}$. Finally, taking the ecological water conveyance project of the Konqi River as an example, the scientific regulation of water resources in the basin is conducted using the calculation results of ecological baseflow and vegetation water requirement, which has significance for realizing river channel restoration and ecological water supply in different level years.

Key words: ecological baseflow; ecological water requirement; natural vegetation; water resource; Konqi River